

SISTEMA DE VIGILANCIA GEODÉSICA EN LAS ISLAS CANARIAS GEODETIC VOLCANO MONITORING SYSTEM IN CANARY ISLANDS

José Fernández⁽¹⁾ y Francisco Luzón⁽²⁾

⁽¹⁾Instituto de Astronomía y Geodesia, Universidad Complutense de Madrid, Fac. C. Matemáticas, Ciudad Universitaria, 28040-Madrid.

⁽²⁾Departamento de Física Aplicada. Universidad de Almería. Cañada de san Urbano s/n. 04120, Almería.

SUMMARY

To define the most suitable volcano monitoring system is a particularly difficult task in the absence of recent activity. It must take into account not only the technical optimization of the monitoring systems, but also their economic and scientific profitability. Traditionally, observations of seismic, hydrologic, or fumarolic activity have proven useful. Since volcanic activity almost inevitably produces deformation and gravity changes before, during, between and after the events geodetic techniques are now included, in the light of the LAVCEI's recommendations regarding routine monitoring. They are proving to be a powerful tool in the monitoring of volcanic activity detecting anomalies sometimes months or weeks before the magma flow leads to earthquakes or other eruption precursors. Geodetic monitoring thus complements seismic monitoring by extending the study of volcanic phenomena from seconds to years and providing details on the growth of magma bodies within the volcano. Canary Islands, with a population of about 1.8 million people, are located less than 100 km from the African continent. They were formed on the continental rise and slope as independent structures. Despite being on a passive margin, they are a volcanic archipelago with a long-standing history of volcanic activity that began more than 40 m.y. ago. At least a dozen eruptions occurred on the islands of Lanzarote, Tenerife, and La Palma between 1500 and 1971. Several different types of volcanic manifestations, which follow a time pattern are to be seen on the Canary Islands. This is a typical case in which the volcanic monitoring system must be carefully designed. The system must be efficient, but must also make full use of existing facilities and have acceptable installation and running costs, in line with the current inactivity. In this presentation we described a proposal for the geodetic monitoring system in Canary Islands. This monitoring system has been developed with base on experimental results from different research projects and the application of theoretical analysis. This system makes use of terrestrial and space geodetic techniques.

1. INTRODUCCIÓN

Es un hecho ampliamente conocido que la actividad volcánica produce deformaciones y variaciones de gravedad antes, durante, tras y entre erupciones (Rhodes and Lockwood, 1995; Rymer and Brown, 1989; Fiske and Shepherd, 1990; Dvorak and Dzurisin, 1997; Pingue et al., 1998; Fernández et al., 1999; Sigurdsson et al., 2000; Owen et al., 2000; Yu et al., 2000). Siguiendo las recomendaciones de la IAVCEI relativas a la vigilancia rutinaria, las medidas geodésicas se están usando de forma cada vez más extendida en volcanes activos y están probando ser capaces de suministrar información fiable sobre efectos precursoros. De esta forma la vigilancia geodésica complementa la sísmica extendiendo el estudio de los fenómenos volcánicos desde segundos a años y suministrando detalles del desarrollo de los cuerpos magmáticos bajo superficie. Por tanto, considerando la diversidad existente y las precisiones alcanzables, las técnicas geodésicas son una herramienta poderosa hoy en día en la vigilancia de reactivación volcánica.

También las nuevas técnicas de geodesia espacial como la Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR) que ha sido testada y ha demostrado ser de gran utilidad para la detección de desplazamientos del terreno a un coste razonable. Esta técnica emplea imágenes radar obtenidas por satélite, como las suministradas por los satélites ERS de la Agencia Europea del Espacio (ESA) (ver p.e., Massonnet and Feigl, 1998; Bürgmann et al., 2000; Hanssen, 2001).

En volcanismo, hablando de forma general, las mayores erupciones están asociadas con volcanes poligenéticos, es decir volcanes centrales o estratovolcanes con erupciones recurrentes en la misma estructura volcánica, estando en estos casos el área a cubrir mediante las técnicas de vigilancia muy bien definida. No obstante, es más difícil predecir futuras erupciones cuando estas no se limitan a un volcán específico sino a una amplia región volcánica (ver p.e., Fernández et al., 1999). Esta es la situación de las Islas Canarias, Figura 1, donde existe un estratovolcán activo, el Teide (Tenerife), y volcanismo histórico monogenético disperso en diferentes islas.

Las Islas Canarias, situadas a menos de 100 km del continente africano, a pesar de estar situadas en un margen pasivo, son un archipiélago volcánico con una continua y larga historia de actividad volcánica que empezó hace más de 40 millones de años (ver p.e., Araña and Ortíz, 1991). Al menos una docena de erupciones han tenido lugar en las islas de Lanzarote, Tenerife y La Palma entre 1500 y 1971. El mayor peligro de erupción volcánica que existe actualmente en las Islas Canarias estaría localizado en volcanes de tipo monogenético y actividad estromboliana.

Las Islas Canarias son un caso típico en el que la vigilancia volcánica debe ser cuidadosamente diseñada. El sistema debe ser eficiente, pero también debe hacer el máximo uso de todas las facilidades existentes, teniendo un coste de instalación y funcionamiento aceptables, de acuerdo con el nivel de actividad actual en el archipiélago.

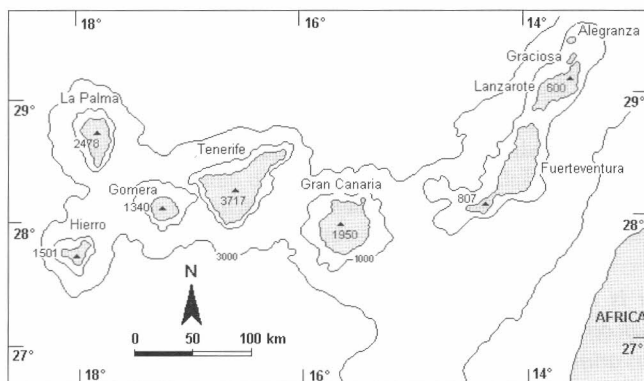


Figure 1 - Localización de las Islas Canarias (Location of the Canary Islands) (Romero et al., 2002).

En este marco nacieron en 1999 dos proyectos de investigación, "DECIDE-VOLCANO. Promotion of space technologies for supporting the management of natural disasters: Earth observation technologies for decision support demonstration" sufragado por la Agencia Europea del Espacio, y "Riesgo sísmico y volcánico en España: Estudio de la aplicación de nuevas técnicas de vigilancia geodésica e interpretación." Financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España (Carrasco et al., 2000a,b; Fernández et al., 2002; Romero et al., 2002a, b). Entre otros, en riesgo volcánico, estos proyectos tenían como objetivo el diseñar una metodología de vigilancia geodésica que usara técnicas terrestres y espaciales en las Islas Canarias. Además, por un claro motivo económico, esta metodología debía hacer el mayor uso posible de la infraestructura ya existente en el archipiélago. Estos Proyectos de Investigación se centraron en las islas de Lanzarote, Tenerife y La Palma, consideradas como las islas de mayor actividad actualmente.

2. VIGILANCIA GEODÉSICA PREVIA

En el Archipiélago Canario existe una gran infraestructura geodésica instalada por el Instituto Geográfico Nacional, aunque no se haya instalado con fines de vigilancia. Esta incluye gran número de vértice geodésicos, así como itinerarios de nivelación de alta precisión y redes geodésicas. Esta infraestructura se encuentra en todas las islas. Esto permite disponer de una información geodésica, coordenadas y valores de gravedad de precisión. Por otra parte, también se han realizado diferentes estudios, en particular en las islas de Tenerife, Lanzarote y La Palma, destinados a vigilancia de actividad volcánica. Veamos estos brevemente.

2.1. Tenerife

Existe una micro-red geodésica de 17 vértices en la Caldera de Las Cañadas en Tenerife (Sevilla and Martín, 1986; Sevilla et al., 1986; Sevilla and Romero, 1991; Sevilla and Sánchez, 1996), que ha sido observada con métodos terrestres clásicos en diferentes ocasiones desde 1982 con el objetivo de detectar posibles deformaciones asociadas a reactivación volcánica. También se usó como procedimiento para resolver problemas de configuración, ya que está situada en la parte sur de la caldera, donde existen dos zonas morfológicamente diferentes, situándose los vértices en ambas. Existen además perfiles de nivelación conectados a esta red (Sevilla et al., 1996). Estos se

instalaban en 1994 y han sido observados varias veces usando nivelación trigonométrica de precisión. Las observaciones realizadas desde 1982 a 2000 en la micro-red y los perfiles, han dado como resultado la no existencia de desplazamientos.

Yu et al. (2000) realizaron un estudio teórico de esta micro-red mostrando claramente la necesidad de extenderla para cubrir la totalidad de la isla si se quería usar con fines de vigilancia de una forma eficaz.

2.2. Lanzarote

Las características estructurales y geodinámicas de Lanzarote, junto a la posibilidad de futura actividad volcánica llevaron al Instituto de Astronomía y Geodesia (IAG), en colaboración con el Cabildo insular, a instalar un Laboratorio Geodinámico permanente en la isla en 1987 (Fernández et al. 1993; Vieira 1994). Entre otros, un objetivo de este Laboratorio es la investigación en la actividad volcánica de la isla y la sismicidad asociada. El Laboratorio, Figura 3, consta de cuatro módulos, tres localizados en la Cueva de los Verdes, en el interior del túnel volcánico del volcán La Corona, y el cuarto en el Parque Nacional de Timanfaya. Desde 1987 se han instalado en él diferentes instrumentos que han permitido la observación continua de deformaciones, variaciones de gravedad, nivel del mar, temperatura de roca, etc. Todos los módulos están conectados con La Casa de los Volcanes, desde donde, vía modem, los datos se transfieren al Instituto en Madrid. Los datos adquiridos en el Laboratorio no han mostrado, entre 1987 y 2000, deformación o variación de gravedad relacionados con actividad volcánica (Fernández et al. 1992; Arnos et al. 2001a, b).

2.3. La Palma

En los últimos años la isla de La Palma ha sido una de las islas más vigiladas de las Canarias. En los aspectos geodésicos, se estableció una red geodésica, observada en 1994, 1996 y 1997 con teodolito y EDM (ver por ejemplo Moss et al., 1999). La red inicial, con 11 vértices, cubría el sistema de fallas desarrollado en el flanco superior de Cumbre Vieja durante la erupción de 1949. En 1997 se extendió la red y se reobservó usando GPS, para incorporar el flanco oeste y la zona sur de la isla. Los resultados obtenidos comparando las diferentes campañas están en el margen de error de las técnicas empleadas.

3. NUEVOS RESULTADOS

3.1. Tenerife

En el marco de los proyectos mencionados previamente se aplicó a la isla el InSAR desde 1999 (Carrasco et al., 2000a,b; Fernández et al., 2002; Romero et al., 2002a). Para ello se usaron 20 imágenes de los satélites ERS-1 y 2 de la ESA, correspondientes al periodo de 1992 a 2000. En la zona de Las Cañadas, al analizar los interferogramas obtenidos no se ha encontrado ninguna deformación entre 1993 y 2000 igual o superior al cm, coincidiendo con los resultados de las redes clásicas existentes. Pero, al cubrir toda la isla, el uso de esta técnica ha permitido detectar deformaciones en dos áreas, ver Figura 1 (Carrasco et al., 2000b). Estas son una deformación en la zona de Garachico, con unos 10 cm de hundimiento entre 1993 y 2000 en una extensión de 15 km² en la colada del volcán Arenas Negras, y una segunda deformación detectada en la zona de Pinar de Chío, un hundimiento de unos 3 cm entre 1993 y 2000 en una extensión de 8 km², que se encuentra al sur de la primera deformación.

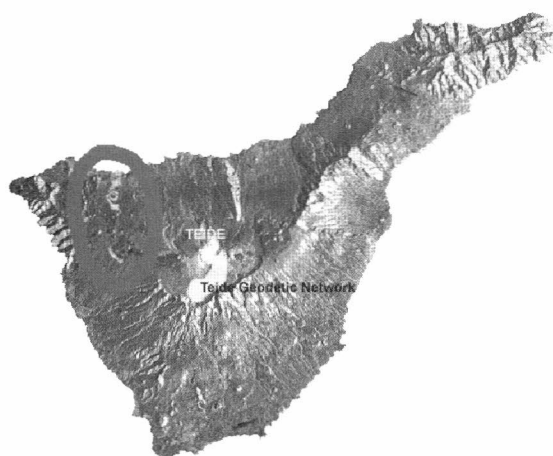


Figura 2 - Zonas de deformación (Deformation zones)

Estos resultados pusieron todavía más de manifiesto la necesidad definir una red GPS que cubriera toda la isla con varios objetivos: la vigilancia de deformaciones en la isla complementando las observaciones radar, y la validación de las deformaciones detectadas. Se diseñó una red principal compuesta de 18 estaciones, usando vértices geodésicos instalados por el IGN, y con coordenadas en el sistema REGCAN95 (Rodríguez-Velasco et al., 2002), implantado por el IGN dentro del enlace entre las Islas Canarias y la red de control europea EUREF. A esta red se le añadió la estación permanente de Santa Cruz de Tenerife. En la zona al sur de Garachico se diseñó una densificación de la red principal que fuese útil para el objetivo de verificar las deformaciones. La red se muestra en la Figura 2. Esta red se observó en 2000 y 2001. Los resultados (Rodríguez-Velasco et al., 2002; González-Matesanz et al., 2002) han permitido validar la deformación detectada en Pinar de Chío.

La introducción de estas técnicas ha permitido el diseño de una nueva metodología de vigilancia geodésica para la totalidad de la isla, combinando las observaciones SAR y GPS, lo que permite la detección de desplazamientos de forma efectiva.

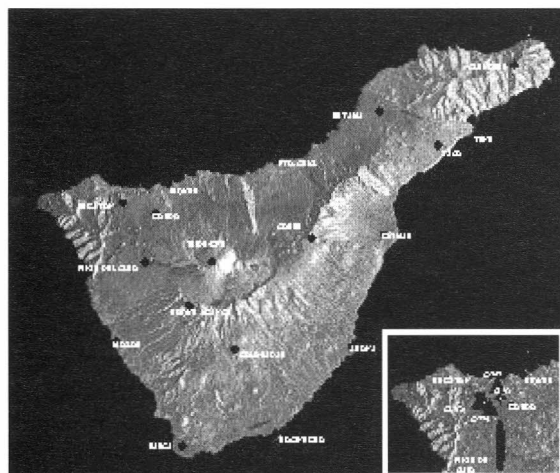


Figura 2 – Red GPS en Tenerife. (GPS network in Tenerife.)

3.2. Lanzarote

La isla de Lanzarote se estudió mediante el uso de InSAR para la detección de posibles deformaciones durante 2000 usando imágenes de los satélites ERS en el periodo de 1992 a 2000 (Carrasco et al., 2000a, b; Fernández et al. 2002). Este estudio ha permitido establecer la existencia de una estabilidad de la coherencia a largo plazo debido a la naturaleza volcánica de la isla (Figura 3). Este resultado es de gran importancia ya que garantiza la aplicabilidad del InSAR como herramienta para una vigilancia sistemática en la isla.

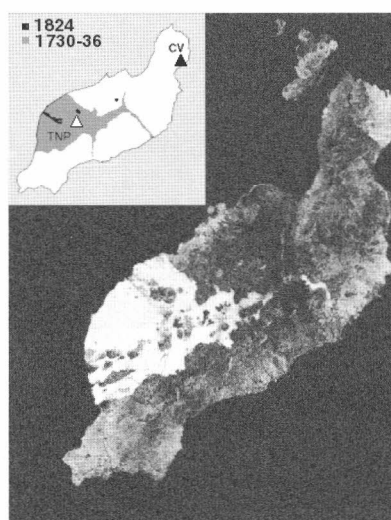


Figura 3 - Imagen de coherencia obtenida usando dos imágenes de 12Agosto95 y 16Agosto97 y mapa de la isla de Lanzarote (parte superior izquierda) mostrando las áreas cubiertas por las últimas erupciones. La localización de los diferentes módulos del Laboratorio Geodinámico de Lanzarote se marca con CV (módulos de Cueva de los Verdes) y TNP (Parque Nacional de Timanfaya) (Romero et al., 2002b) (Coherence image obtained using two images from 12Aug95 and 16Aug97 and sketch map of Lanzarote island (upper left side of figure) showing the areas covered by the last two eruptions. The location of the different modules of the Geodynamic Laboratory are marked with CV (Cueva de los Verdes modules) and TNP (Timanfaya National Park module))

El análisis de los interferogramas obtenidos ha permitido concluir que, en el periodo 1992-2000 no ha habido ningún desplazamiento apreciable que pueda ser asociado a una reactivación volcánica en la isla de Lanzarote, siendo este resultado consistente con los obtenidos en el Laboratorio Geodinámico para el mismo periodo (Romero et al, 2002b).

3.3. La Palma

Para el estudio de la isla de La Palma mediante InSAR se han usado 6 imágenes radar obtenidas por los satélites ERS-1 y ERS-2 de la ESA entre los años 1992-1999. No se ha disuelto, en esta primera etapa de un modelo digital del terreno, por eso sólo se han procesado 3 interferogramas con esas 6 imágenes (Fernández et al., 2002; Romero et al., 2002a). Con el análisis de estos hemos podido comprobar que no existe una deformación superior a la decena de centímetros, pero pequeñas deformaciones pueden estar enmascaradas en los interferogramas no corregidos de la topografía. Estos resultados son consistentes

con los obtenidos mediante la observación de la red geodésica existente (Moss et al., 1999).

En esta isla gran parte de su superficie está cubierta por una abundante vegetación que hace que la coherencia no sea suficientemente buena. Las zonas de mayor coherencia corresponden con flujos de lava recientes localizados de las últimas erupciones localizadas en el sur de la isla, ver Figura 4. Se está realizando actualmente un estudio más fino utilizando un modelo digital del terreno. Ver Fernández et al. (2002) y Romero et al. (2002a) para más detalles.

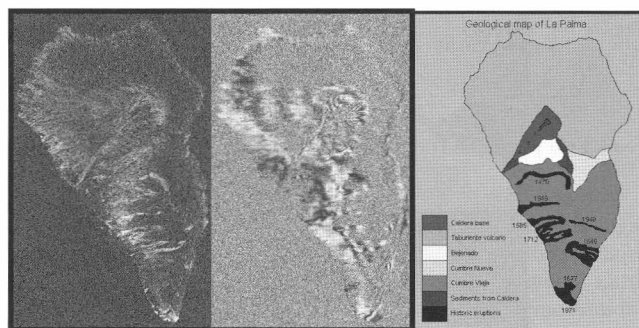


Figura 4 - (a) Coherencia y (b) interferograma obtenido usando imágenes del 10-10-93 y 20-08-95 (688 días de separación), con una línea de base ortogonal de 12 m. (c) muestra un mapa geológico de la isla de La Palma. Las áreas de mayor coherencia corresponden a flujos de lava de las últimas erupciones en la isla. (Fernández et al., 2002) ((a) Coherence and (b) interferogram obtained using images of the dates October 10, 1993 and August 20, 1995 (688 days of separation). Orthogonal baseline of 12 m. (c) shows a geological map of La Palma island. The higher coherence areas correspond to lava flows of last eruptions occurred in the island.)

4. SISTEMA DE VIGILANCIA GEODÉSICA PROPUESTO

Nuestros resultados muestran claramente que añadir la interferometría radar (InSAR) como una nueva técnica geodésica de vigilancia de reactivación volcánica en las Islas Canarias mejora las posibilidades de detección de desplazamientos precursores de erupciones al suministrar la imagen de zonas muy amplias de las diferentes islas. En particular ayuda a resolver el problema causado por la limitada cobertura espacial de las observaciones geodésicas realizadas normalmente en el archipiélago. No obstante es necesario complementarla con otras técnicas, en particular redes GPS. Es de especial interés resaltar que cada una de estas técnicas por separado no resulta totalmente eficaz: no se tiene buena coherencia en la totalidad de las islas que permita obtener resultados precisos InSAR, la técnica InSAR actualmente no permite obtener las tres componentes de los posibles desplazamientos, y por otro lado, las observaciones GPS proporcionan sólo medidas puntuales. Sin embargo, la combinación de ambas permite la detección de desplazamientos de una forma efectiva.

Estudios teóricos y experimentales (ver p.e., Fernández et al., 2001a, b, c) ponen de manifiesto la necesidad de disponer de forma simultánea de datos de deformación y variaciones de gravedad para realizar una interpretación correcta de las anomalías observadas en ambientes volcánicos, siendo necesario también la realización de una inversión conjunta de estos datos.

Teniendo en cuenta todos estos resultados de ambos proyectos, el uso de las instalaciones ya existentes en el archipiélago y un coste lo más reducido posible, las metodologías de vigilancia propuestas son, por islas, las siguientes:

TENERIFE: InSAR (unas 6 imágenes al año, considerando la existencia de deformaciones detectadas en la isla). Observación de una red GPS que cubra toda la isla y de una red gravimétrica de forma simultánea. La red gravimétrica sería muy conveniente que coincidiese con la GPS, ya que permitiría tener un control sobre las variaciones de altitud de sus estaciones imposible de otra forma. La frecuencia de observación de estas redes, en periodos de no muy clara actividad, sería de unos 2 o tres años.

LANZAROTE: en esta isla se usaría el Laboratorio de Geodinámica y el InSAR (unas 3 imágenes año) de forma sistemática. Se dispondría de redes GPS y gravimétrica de análogas características a las de Tenerife, pero con un periodo de observación superior, quizás de 5 años, ya que la instrumentación del Laboratorio serviría como un primer instrumento de alarma.

LA PALMA: para esta isla se usaría InSAR (unas 6 imágenes al año, al menos en un primer periodo de tiempo hasta establecer con rotundidad la existencia o no de desplazamientos en la isla) combinado también con la observación de una red GPS que cubra toda la isla y de una red gravimétrica de análogas características a las anteriores. La frecuencia de observación en este caso sería análoga a la de Tenerife, una vez estudiada la existencia o no de desplazamientos.

RESTO DE ISLAS: InSAR (3 a 6 imágenes año) y definición de redes GPS y gravimétrica con periodo de observación de unos 5 años.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha sufragado con el proyecto AMB99-1015-C02 del MCyT, el ESA-ESRIN Contract No.13661/99/I-DC y el contrato MEDSAR con INDRA Espacio, S.A.. Agradecemos de forma especial el trabajo de todo el personal científico y técnico que ha participado en esos Proyectos de Investigación y al Instituto Geográfico Nacional su inestimable apoyo.

6. REFERENCIAS

- Araña, V., and R. Ortiz (1991). "The Canary Islands: Tectonics, magmatism and geodynamic framework", in *Magmatism in extensional structural settings. The Phanerozoic African Plate*, A. B. Kampunzu, R. T. Lubala, (Eds.), pp. 209-249, Springer-Verlag, Berlin.
- Arnos J, Fernández J, Vieira R (2001a). "Interpretation of tidal gravity anomalies in Lanzarote, Canary Islands". *Journal of Geodynamics* 31: 341-54
- Arnos J, Vieira R, Vélez E, Weixin C, Shiling T, Jun J, Venedikov AP (2001b). "Monitoring tidal and non-tidal tilt variations in Lanzarote island (Spain)". *J Geod Soc Japan* 47: 456-62
- Bürgmann, R., Rosen, P.A. y Fielding, E.J. (2000) "Synthetic Aperture Radar Interferometry to measure Earth's Surface Topography and its Deformation". *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 28, 169-209.
- Carrasco, D., J. Fernández, R. Romero, V. Araña, A. Martínez, V. Moreno y M. Paganini (2000a): "First results from operational volcano monitoring in the Canary Islands", *Proc. ERS-ENVISAT Symposium*.

- Carrasco, D., Fernández, J., Romero, R., Araña, V., Martínez, A., Moreno, V., Aparicio, A. & Paganini, M. (2000b) "First results from operational volcano monitoring in the Canary Islands". *ESA, SP-461, ERS-ENVISAT SYMPOSIUM*, Gothenburg, Sweden 16-20/10/2000. 6 pp.
- Dvorak, J.J., and D. Dzuring (1997). "Volcano geodesy: the search for magma reservoirs and the formation of eruptive vents", *Rev. of Geophys.*, 35, 343-384.
- Fernández J, Vieira R, Díez JL, Toro C (1992). "Investigations on crustal thickness, heat flow and gravity tide relationship in Lanzarote island". *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 74:199-208.
- Fernández J, Arnoso J, Vieira R (1993). "Investigación en riesgo volcánico en Lanzarote". *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid*, Tomo LXXXVIII, Cuad. 2º y 3º, 479-84.
- Fernández, J., J. M. Carrasco, J. B. Rundle, and V. Araña, (1999). "Geodetic methods for detecting volcanic unrest: A theoretical approach", *Bull. Volcanol.*, 60, 534-544.
- Fernandez, J., Charco, M., Tiampo, K. F., Jentzsch, G., Rundle, J. B. (2001a). "Joint interpretation of displacements and gravity changes in volcanic areas. A test example: Long Valley Caldera, California". *Geophysical Research Letters*, 28, 1063-1066.
- Fernandez, J., Tiampo, K. F., Jentzsch, G., Charco, M., Rundle, J. B. (2001b). "Inflation or deflation? New results for Mayon volcano applying elastic-gravitational modeling". *Geophysical Research Letters*, 28, 2349-2352.
- Fernández, J., Tiampo K. F., Rundle, J. B. (2001c). "Viscoelastic displacement and gravity changes due to point magmatic intrusions in a gravitational layered solid Earth". *Geophysical Journal International*, 146/1, 155-170.
- Fernández, J., Romero, R., Carrasco, D., Luzón, F., Araña, V. (2002). "InSAR Volcano and Seismic Monitoring in Spain. Results for the Period 1992-2000 and Possible Interpretations". *Optics and Lasers in Engineering*, 37/2-3, 285-297.
- Fiske, R. S., and J. B., Shepherd (1990). "Twelve years of ground-tilt measurements on the Soufrière of St. Vincent 1977-1989", *Bull. Volcanol.*, 52, 227-241.
- González-Matesanz, F.J., J. Fernández, J.F. Prieto, A. Staller, G. Rodríguez-Velasco y A. Alonso-Medina (2002). "Vigilancia GPS en la isla de Tenerife: metodología y resultados". *Comunicaciones de la 3ª Asamblea Hispano-Portuguesa*, 4 p. (Este volumen)
- Hanssen, R.F. (2001) "Radar Interferometry. Data interpretation and error analysis". Kluwer Academic publ., 308 pp.
- Massonnet, D. y K. Feigl (1998): "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface", *Reviews of Geophysics*, 36, 441-500.
- Moss J L, McGuire W J, Page D. (1999). "Ground deformation of a potential landslide at La Palma, Canary Islands". *J Volcanol Geotherm Res*; 94:251-265.
- Owen, S.P., Segall, P., Lisowski, M., Miklius, A., Denlinger, R., and Sako, M. (2000). "The rapid deformation of Kilauea volcano: GPS measurements between 1990 and 1996". *J. Geophys. Res.*, 105, 18983-18998.
- Pingue, F., Troise, C., De Luca, G., Grassi, V., and Scarpa, R. (1998). "Geodetic monitoring of Mt. Vesuvius volcano, Italy, based on EDM and GPS surveys". *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 82, 151-160.
- Rhodes, J.M., and J.P. Lockwood, (Eds.) (1995). "Mauna Loa Revealed. Structure, Composition, History, and Hazards", AGU, Washington.
- Rodríguez-Velasco, G., R. Romero, T.-T. Yu, F.J. González-Matesanz, R. Quirós, A. Dalda, D. Carrasco y J. Fernández (2002). "Introducción de técnicas espaciales a los sistemas de vigilancia geodésica en Tenerife (Islas Canarias)". *Comunicaciones de la 3ª Asamblea Hispano-Portuguesa*, 4 p. (Este volumen)
- Romero, R., D. Carrasco, J. Fernández, A. Martínez, V. Moreno and V. Araña (2002a) "Results from DECIDE-VOLCANO Project. Application in the Canary Islands and Ecuador". *Comunicaciones de la 3ª Asamblea Hispano-Portuguesa*, 4 p. (Este volumen)
- Romero, R., D. Carrasco, V. Araña and J. Fernández (2002b). "A new approach to Lanzarote deformation monitoring: an eight-year radar perspective". *Bulletin of Volcanology* (en prensa)
- Rymer, H., and G. Brown (1989). "Gravity changes as a precursor to volcanic eruption at Poas volcano, Costa Rica", *Nature*, 342, 902-905.
- Sevilla, M. J. and Martin, M. D. (1986). "Geodetic network design for crustal deformation studies in the Caldera of Teide area". *Tectonophysics*, 130: 235-248.
- Sevilla, M.J., Martín, M.D. and Camacho, A.G. (1986). "Data analysis and adjustment of the first geodetic surveys in the Caldera of Teide, Tenerife, Canary Islands". *Tectonophysics*, 130: 213-234.
- Sevilla, M.J. and Romero, P. (1991). "Ground deformation control by static analysis of a geodetic network in the Caldera of Teide". *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 47: 65-74.
- Sevilla, M.J. and Sánchez, F.J. (1996). "Geodetic network for deformation monitoring in the Caldera of Teide". In: *The European Laboratory Volcanoes. Proc. 2nd workshop*, Santorini, Greece, 2-4 May, 1996. European Commission. 615-636.
- Sevilla, M.J., Valbuena, J.L., Rodríguez-Díaz, G. and Vara, M.D. (1996). "Trabajos altimétricos en la Caldera del Teide". *Física de la Tierra*, 8, 117-130.
- Sigurdsson, H., B. Houghton, S.R. McNutt, H. Rymer, and J. Stix, (Eds.) (2000). "Enciclopedia of Volcanoes", Academic Press, San Diego.
- Vieira R (1994). "La estación geodinámica de Lanzarote". In: Serie Casa de los Volcanes, Cabildo Insular de Lanzarote, 3: 31-40
- Yu T-T, Fernández J, Tseng C-L, Sevilla M J, Araña V. (2000). "Sensitivity test of the geodetic network in Las Cañadas Caldera, Tenerife, for volcano monitoring". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*; 103: 393-407.